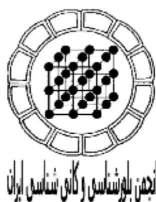
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و سوم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۹۴، از صفحهٔ ۶۵۱ تا ۶۶۰



دما و فشار دگرگونی، پایداری فازها و منطقه‌بندی شیمیایی در گارنت و بیوتیت سنگ‌های دگرگون منطقه‌ی جندق با استفاده از روش شبه مقاطع

محسن موذن[*1]، سمیه ترابی اصل[1]، هادی عمرانی[2]

۱- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان

(دریافت مقاله: ۹۳/۹/۲ ، نسخه نهایی: ۹۳/۱۰/۲۵)

چکیده: در این مقاله با استفاده از شیمی کل سنگ و محاسبات ترمودینامیکی به روش شبه مقاطع، دما و فشار دگرگونی سنگ‌های رسی دگرگون شده منطقه‌ی جندق در شمال شرق اصفهان مورد بررسی قرار گرفتند. داده‌های مورد استفاده از پژوهش قبلی انجام شده در منطقه توسط پژوهشگران دیگر اقتباس شدند، ولی در اینجا روش شبه مقاطع استفاده برای اولین بار ارائه می‌شود. در بررسی قبلی دمای دگرگونی ۴۰۰ تا ۶۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار دگرگونی ۲ تا ۶ کیلوبار تعیین شدند. در این مقاله ضمن تائید نتایج قبلی، دما و فشار به‌صورت دقیق‌تری تعیین می‌شوند. از طرف دیگر منطقه بندی شیمیایی گارنت و بیوتیت نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه گارنت و بیوتیت از مهم‌ترین کانی‌های فرومنیزین در این سنگ‌ها هستند، تغییر منطقه‌بندی برای عناصر آهن و منیزیم برای این دو کانی مشخص شده و دما و فشار دگرگونی با توجه به کسر مولی آهن و منیزیم گزارش شده در آن‌ها محاسبه شدند، و با استفاده از شیمی سنگ کل پایداری فازهای کانی‌شناسی با دما و فشار و تغییرات فازی با افزایش درجه‌ی دگرگونی برای این سنگ‌ها مدل سازی شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: *دما-فشار سنجی؛ سنگ‌های رسی دگرگون؛ شبه‌مقاطع؛ مدل‌سازی پایداری فازی.*

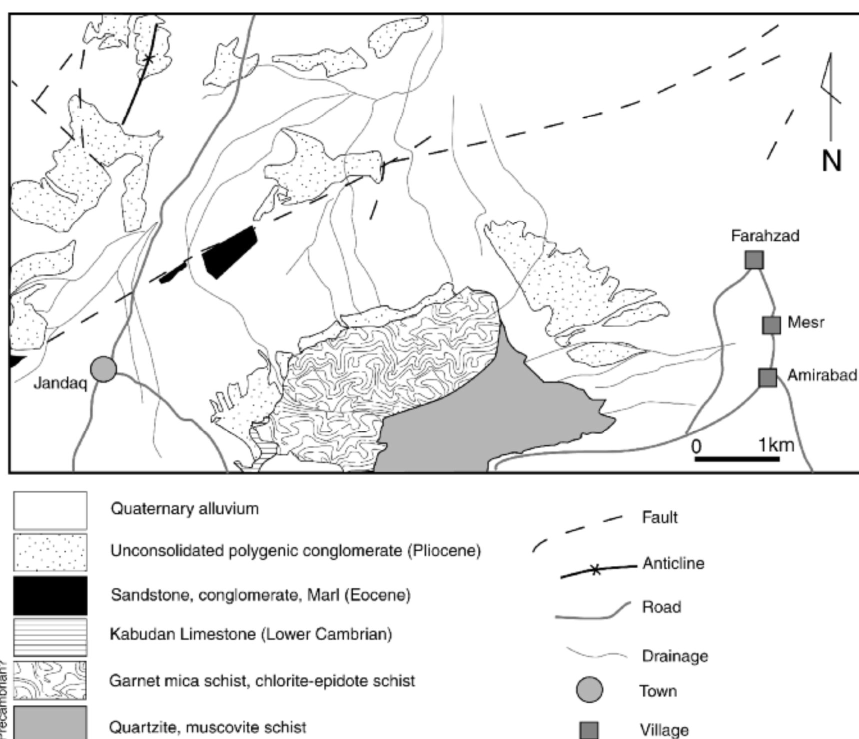
مقدمه

با تعیین دما و فشار دگرگونی در یک منطقه می‌توان گرادیان زمین گرمایی را با در دست داشتن دما و فشار مشخص کرد. هر محیط زمین‌ساختی گرادیان زمین گرمایی خاص خود را دارد. در نتیجه اطلاع از گرادیان زمین گرمایی می‌تواند ما را به محیط زمین‌ساختی بخشی از پوسته‌ی زمین در گذشته و چگونگی شکل گیری‌های ژئودینامیکی آن رهنمون شود [۱]. با توجه به این مطلب اهمیت محاسبه‌ی دما و فشار برای سنگ‌های دگرگون مشخص می‌شود [۲]. دانشمندان پیوسته در صدد ابداع روش‌های مطمئن با خطای کمتر برای محاسبه‌ی دما و فشار (شرایط تعادل ترمودینامیکی) سنگ‌های پوسته و گوشته‌ی زمین بوده‌اند [۳-۵]. مهم‌ترین روش‌های دما و فشارسنجی شامل استفاده از شیمی تک کانی‌ها مانند آمفیبول و پیروکسن، استفاده از دماسنجها و فشارسنج‌های معمول مانند واکنش‌های تبادل کاتیونی (برای مثال توزیع آهن و منیزیم بین گارنت و بیوتت)، استفاده از دماسنج‌های سولوس بین کانی‌ها و استفاده از واکنش‌های تعادلی چند گانه است [۶]. مشکل اصلی در این دما و فشارسنجها علاوه بر خطاهای مربوط به مدرج‌کردن‌های مختلف، لزوم داشتن کانی‌های خاص (قابل استفاده در دما و فشارسنجی) است. با این حال این دما و فشارسنجها از مهم‌ترین و متداول‌ترین ابزارهای براورد شرایط ترمودینامیکی تعادل‌های فازی در سنگ‌های دگرگون هستند.

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۴۱۳۳۳۹۳۹۲۲، نمابر: ۰۴۱۳۳۳۵۶۰۲۷، پست الکترونیکی: moazzen@tabrizu.ac.ir

روش استفاده از شبه‌مقاطع (pseudosections) که اولین بار توسط هنسن [۷] ارائه شد، امروزه توسط دانشمندان برای تعیین شرایط ترمودینامیکی تبلور کانی‌ها و مدل سازی‌ها در سنگ‌شناسی دگرگون استفاده می‌شود [۸-۱۰]. اصل این روش بر این مبنا استوار است که برای شیمی کل یک نمونه سنگی با کانی‌های مشخص در حال تعادل تنها یک دما و فشار تعادلی می‌توان در نظر گرفت. چنانکه شیمی سنگ ثابت باشد تغییر کانی‌ها تغییر دما و فشار و شرایط جدید ترمودینامیکی را نشان می‌دهد. برتری روش استفاده از شبه‌مقاطع عدم وابستگی محاسبه دما و فشار به دانستن ترکیب کانی‌ها (داده‌های ریز پردازشی) است و با اطلاع از شیمی کل سنگ و نوع کانی‌های موجود در سنگ، می‌توان گستره‌ی دما و فشار تشکیل سنگ‌ها را مشخص کرد. هر چند در دست داشتن داده‌های شیمی کانی‌ها یا داده‌های ریز پردازشی می‌تواند ما را در محاسبات و مدل سازی‌های پیش رفته‌تر کمک کند. داده‌های وابسته به شیمی کل سنگ آسانتر است و نیز محاسبه‌ی دما و فشار با استفاده ازروش شبه‌مقاطع قابلیت‌های بالایی دارد. این مقاله برای معرفی این روش و بررسی نتایج حاصل از آن به‌صورت موردی در خصوص سنگ های رسی دگرگون شده‌ی منطقه جندق نوشته شده است.

برنامه‌های رایانه‌ای متعددی برای محاسبات شبه‌مقاطع با استفاده از بانک‌های اطلاعاتی داده‌های ترمودینامیکی کانی‌ها تهیه شده‌اند. مهم‌ترین این برنامه‌های رایانه‌ای عبارتند از برنامه‌ی THERMOCALC [۱۱]، برنامه PREPLE-X [۱۳،۱۲] و برنامه‌ی THERIAK-DOMINO [۱۴]. منطق مورد استفاده در تمامی برنامه‌ها برای محاسبات شبه‌مقاطع یکی است. بدین ترتیب که بر اساس شیمی سنگ کل و کانی-های موجود و داده‌های ترمودینامیکی کانی‌ها، شرایط دما و فشاری برای دستیابی به آن کانی‌ها از آن شیمی کل خاص محاسبه می‌شود. ولی زبان برنامه‌نویسی مختلف (برای مثال زبان فورترن برای THERMOCALC)، چگونگی ساختن فایل ورودی داده‌ها، نحوه به کار گیری داده‌های ترمودینامیکی کانی‌ها (برای مثال حجم مولی، ظرفیت گرمای ویژه، آنتروپی...) و چگونگی به‌کارگیری مدل‌های مختلف انحلال جامد (مانند مدل ایده آل و مدل غیر ایده‌آل) در این برنامه‌ها متفاوت است. در این پژوهش از برنامه THERIAK-DOMINO به همراه بانک اطلاعاتی داده‌های ترمودینامیکی کانی‌ها از [۱۵] استفاده شده است.



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی ساده شده منطقه جندق (برگرفته از[۱۸]).

برای محاسبات موردی، سنگ‌های رسی دگرگون شده‌ی منطقه‌ی جندق در شمال شرق اصفهان انتخاب شدند. داده‌های استفاده شده در این پژوهش از مقاله طباطبائی منش و شریفی [۱۶] برداشته شده‌اند (جدول ۱). این انتخاب به چند دلیل بوده است. اول اینکه این کار پژوهشی توسط محققینی غیر از تیم پژوهشی ما صورت گرفته است (توسط طباطبائی منش و شریفی [۱۶]) و کار مقایسه دما و فشارهای به‌دست آمده از آن با محاسبات این مقاله مناسب‌تر بوده است. دوم در بررسی آن‌ها [۱۶] زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری، شیمی سنگ کل، شیمی کانی‌ها و دما و فشارسنجی سنگ‌ها به‌خوبی صورت گرفته است. سوم اینکه طباطبائی منش و شریفی [۱۶] در مقاله‌ی خود به بررسی منطقه‌بندی شیمیایی گارنت پرداخته‌اند که ما نیز به بررسی آن و نیز منطقه‌بندی بیوتیت با استفاده از روش شبه‌مقاطع خواهیم پرداخت.

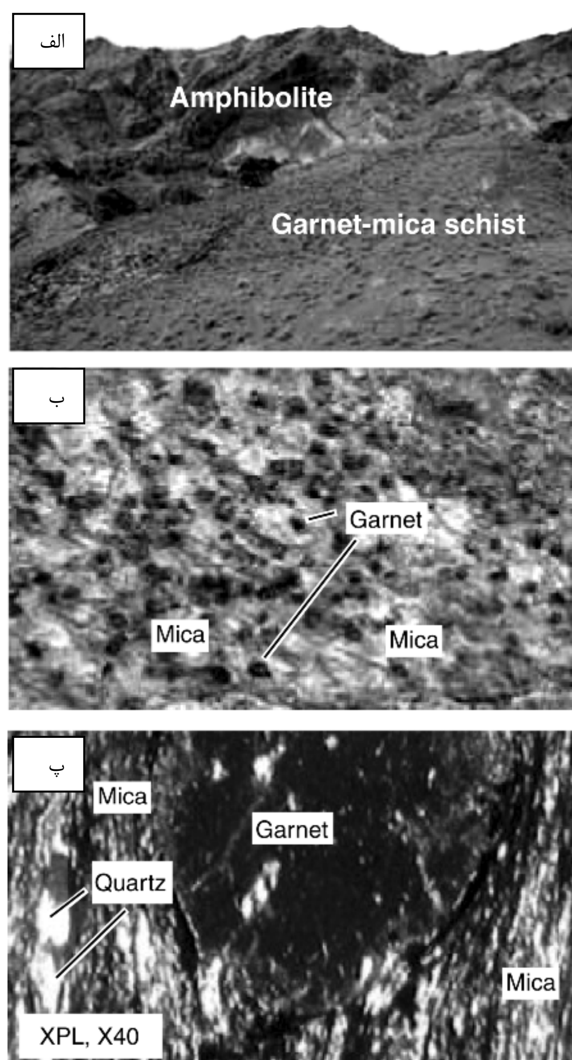
خلاصه‌ای از زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی سنگ‌های رسی گرگون شده منطقه جندق

منطقه‌ی جندق در شمال شرقی اصفهان و از نظر منطقه بندی رسوبی ساختاری، در ایران مرکزی قرار گرفته است [۱۷]. مهم-ترین سنگ‌های دگرگون منطقه جندق سنگ‌های رسی دگرگون شده و یا متاپلیت‌ها و آمفیبولیت‌ها هستند. رومانکو و همکاران [۱۸] سن این سنگ‌ها را پروتروزوئیک بالایی تا پالئوزوئیک پایینی در نظر گرفته‌اند. آهک کبودان با سن کامبرین زیرین با مرز گسلی در کنار سنگ‌های دگرگون قرار دارد (شکل ۱). از واحدهای دیگر همراه سنگ‌های رسی دگرگون می‌توان به واحدی با تناوب ماسه سنگ، سیلت و کنگلومرا. با آثار فسیل‌های گیاهی (سازند چاه پلنگ به سن کرتاسه) و آهک‌های اوربیتولین‌دار کرتاسه پایینی اشاره کرد. این واحدها نیز با سنگ‌های دگرگون مرزی گسلی دارند [۱۹]. شکل ۲ الف ارتباط صحرایی بین سنگ‌های گارنت- میکا شیست رسی و آمفیبولیت‌های بازی را نشان می‌دهند. شکل ۲ ب نمائی نزدیک از گارنت-میکا شیست‌ها را به نمایش می‌گذارد.

سنگ‌نگاری سنگ‌های رسی دگرگون شده منطقه‌ی جندق با جزئیات توسط طباطبائی منش و شریفی [۱۶] بررسی شدند. به‌نظر آن‌ها سه نوع شیست در مجموعه سنگ‌های دگرگون جندق قابل شناسایی هستند. این شیست‌ها عبارتند از (۱) کوارتز – مسکوویت- بیوتیت شیست (شکل ۲ پ)، (۲) گارنت- مسکوویت- کلریت شیست (۳) گارنت - بیوتیت- مسکوویت - استارولیت شیست. سنگ‌های نوع اول بافت لپیدوبلاستی بسیار مشخصی دارند که از سمت‌گیری کانی‌های میکایی حاصل شده است. کانی‌های فرعی شامل کلریت و اکسید آهن هستند [۱۶]. گارنت مهم‌ترین کانی دگرگون در گروه دوم است که حدود ۱۰ درصد مودی سنگ را به خود اختصاص داده است. گارنت‌های درشت اغلب با گارنت‌های ریزتر در حاشیه همراهی می‌شوند [۲].

جدول ۱ تجزیه سنگ کل شیست‌های رسی منطقه جندق به همراه در صد مولی کاتیون‌های محاسبه شده در سیستم NCKFMASH که به عنوان ورودی برنامه Theriak-Domino. تجزیه توسط [۱۶] صورت گرفته است.

Oxide	Wt%	Molar cation %
SiO_2	۶۱٫۵۵	Si (۵۸٫۰۵)
TiO_2	۱٫۰۱	--
Al_2O_3	۱۹٫۲۸	Al (۲۴٫۶۳)
FeO	۹٫۵۱	Fe (۵٫۵۸)
MnO	۰٫۱۱	--
MgO	۱٫۰۴	Mg (۳٫۴۶)
CaO	۱٫۳۷	Ca (۱٫۰۳)
Na_2O	۲٫۴۹	Na (۱٫۶۲)
K_2O	۳٫۴۲	K (۵٫۶۲)
P_2O_5	۰٫۰۵	--
Total	۹۹٫۸۴	--



شکل ۲ سنگ‌های دگرگون منطقه‌ی جندق. الف. برونزد گارنت- میکا شسیت و آمفیبولیت. ب. گارنت‌های نسبتاً درشت در گارنت- میکا شیست. پ. مقطع میکروسکوپی از گارنت- میکا شیست. برگوارگی سنگ از بالا به پائین مشخص است. تصاویر برگرفته از [۱۶] با تغییرات.

سنگ‌های دارای استارولیت درشت دانه بوده و کانی‌های مسکوویت و به مقدار کمتر بیوتیت بافت لپیدوبلاستی سنگ را تشکیل می‌دهند. استارولیت و گارنت درشت‌تر، بافت پورفیروبلاستی را ایجاد کرده‌اند. تغییر از سنگ‌های رسی دگرگون بدون گارنت به سنگ‌های رسی گارنت‌دار و سپس استارولیت دار، چنانکه طباطبایی منش و شریفی [۱۶] نشان داده‌اند نشان دهنده دگرگونی پیش رونده در این منطقه است.

براورد شرایط دما و فشار و منطقه‌بندی شیمیایی گارنت، بیوتیت و استارولیت

به‌منظور تعیین دما و فشار دگرگونی، طباطبائی منش و شریفی [۱۶] با توجه به تعادل بافتی بین گارنت و استارولیت از یک سو و تعادل بافتی بین گارنت و بیوتیت از سوی دیگر، از واکنش‌های تبادلی آهن و منیزیم بین گارنت- استارولیت و گارنت-بیوتیت استفاده کرده‌اند. همچنین از تعادل بین کانی‌های Qz + Grt + Ms + Fsp + Bt (علام اختصاری نام کانی‌ها از [۱۴]) برای تعیین فشار استفاده کرده‌اند. بدین ترتیب دمای محاسبه شده برای مجموعه‌ی کانی‌های گارنت‌دار بین ۴۰۰ تا ۶۷۰ درجه‌ی سانتیگراد محاسبه شده است [۱۶] فشار محاسبه شده نیز بین ۲ تا ۶٫۴ کیلوبار بوده است [۱۶].

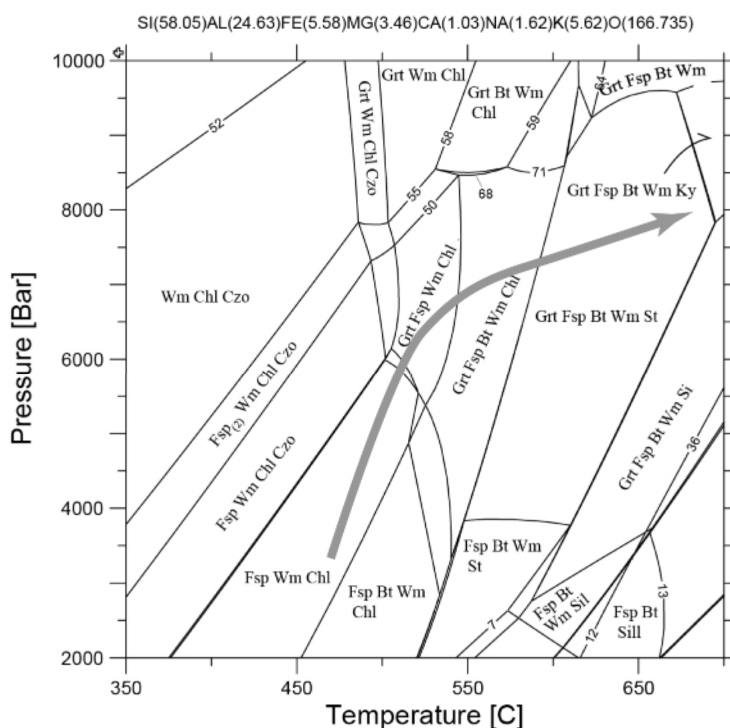
در این مقاله با استفاده از ترکیب سنگ کل و مجموعه کانی‌های موجود، با استفاده از روش سودوسکشن اقدام به محاسبه دما و فشار شده است. برای این کار از درصد اکسیدهای اصلی مقدار درصد مولی عناصر محاسبه شده است، و سپس درصد مولی عناصر به‌عنوان ورودی برنامه‌ی

THERIAK-DOMINO [۱۴] به کار گرفته شدند. شبه‌مقاطع محاسبه شده در شکل ۳ دیده می‌شود. مجموعه کانی‌های سیستم KFMASH در سنگ‌های مورد بررسی عبارتند از:

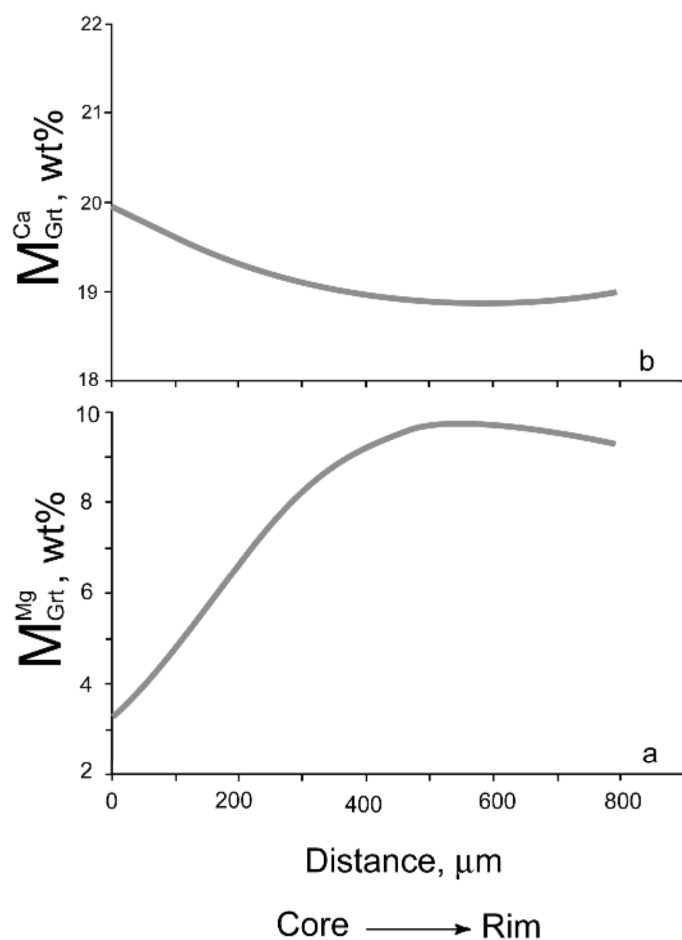
Ms + Chl + Qtz [1]
Grt + Ms + Fsp + Chl + Qz [2]
Grt + Bt + Ms + Fsp + Chl + Qz [3]
Grt + Bt + Ms + Fsp + St + Qz [4]

این گستره‌ها در شکل ۳ با یک پیکان خاکستری به هم وصل شده‌اند. بدین ترتیب مسیر دمایی و فشاری تجربه شده به وسیله‌ی سنگ‌های رسی منطقه جندق به‌دست می‌آید. با توجه به‌عدم وجود کلینوزوئسیت در سنگ‌های مورد بررسی، شروع دگرگونی از گستره‌ی پایداری موسکویت، فلدسپار، کلریت و کوارتز بوده است. سیلیمانیت و کیانیت در این سنگ‌ها ظاهر نشده‌اند. این ویژگی‌ها مسیر دمایی و فشاری را روی نمودار شکل ۳ مشخص می‌کنند که با پیکان نشان داده شده است. مسیر دما- فشار مشخص شده خیلی نزدیک به مسیر مشخص شده توسط طباطبائی منش و شریفی [۱۶] است. لازم به یاوآوری است که اعداد بالای شکل برای عناصر مختلف درصد مولی آن‌ها در نمونه‌ی سنگ رسی دگرگون منطقه‌ی جندق را نشان می‌دهند.

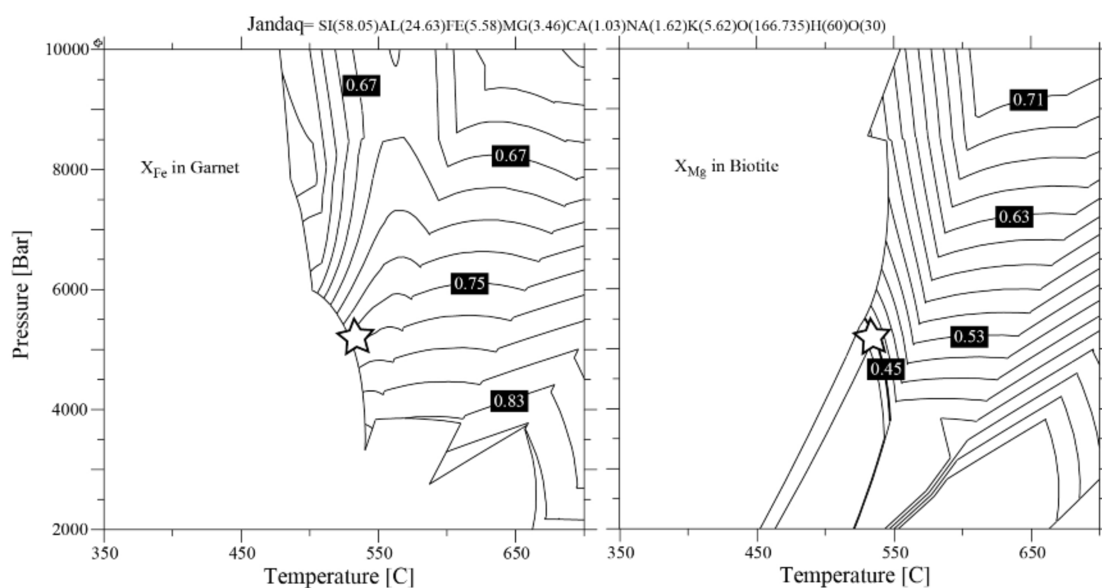
بررسی‌های طباطبائی منش و شریفی [۱۶] نشان می‌دهد که گارنت در این سنگ‌ها منطقه‌بندی شیمیایی نشان می‌دهد (شکل ۴). در این منطقه‌بندی مقدار کلسیم از مرکز به حاشیه بلورهای گارنت کاهش و مقدار منیزیم افزایش می‌یابد. کاهش کلسیم آهسته بوده و سپس تقریباً به‌صورت خطی در می‌آید. کاهش کلسیم در گارنت‌های غنی از آلماندن در سنگ‌های رسی می‌تواند نشانگر کاهش فشار باشد. مقدار منیزیم، به طور چشمگیری از مرکز به حاشیه‌ی بلور افزایش می‌یابد. افزایش منیزم با افزایش دمای دگرگونی همخوانی دارد. با این توصیف گارنت در سنگ‌های رسی منطقه‌ی جندق طی دگرگونی پیش رونده‌ی گرمای با کاهش جزئی فشار رشد کرده است. برای بررسی دقیق‌تر منطقه‌بندی در گارنت‌های موجود در سنگ‌های رسی منطقه‌ی جندق نیز از محاسبات شبه‌مقاطع بهره گرفته ایم. با توجه به تبادل کاتیونی برای آهن و منیزیم بین گارنت و بیوتیت، منطقه‌بندی شیمیایی این دو کانی در کنار هم بررسی شده‌اند (شکل ۵).



شکل ۳ شبه‌مقاطع محاسبه شده برای نمونه‌ای از سنگ‌های رسی دگرگون منطقه جندق با استفاده از برنامه‌ی Theriak-Domino. پیکان خاکستری چگونگی تغییر دما- فشار این سنگ‌ها را نشان می‌دهد. اعداد بالای شکل برای عناصر، نسبت مولی آن‌هاست که با استفاده از درصد اکسیدها محاسبه شده است. همه‌ی گستره‌ها دارای کوارتز نیز هستند.



شکل ۴ منطقه‌بندی شیمیایی کلسیم و منیزیم برای کانی گارنت در سنگ‌های رسی دگرگون شده منطقه‌ی جندق (برگرفته از [۱۶]).



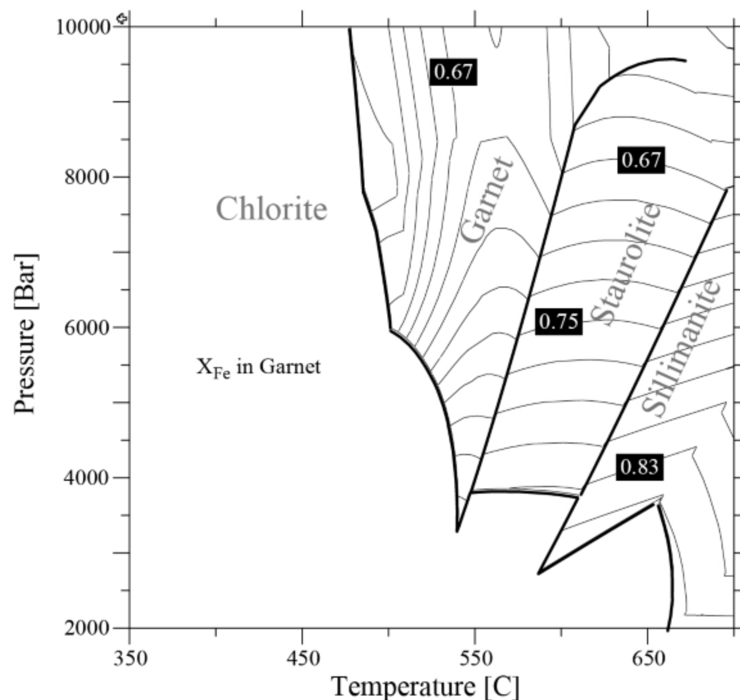
شکل ۵ منطقه‌بندی شیمیایی برای گارنت و بیوتیت در سنگ‌های رسی دگرگون شده منطقه‌ی جندق، و محاسبه شده با THERIAK-Domino. اعداد در مستطیل‌های تیره روی شکل‌ها کسر مولی آهن در گارنت و کسر مولی منیزیم در بیوتیت را نشان می‌دهند. ستاره‌ها دما و فشار دگرگونی را نشان می‌دهند.

شکل ۵ منحنی‌های مقدار آهن (کسر مولی آهن در گارنت یا X_{Fe}) و مقدار منیزیم در بیوتیت (کسر مولی منیزیم در بیوتیت یا X_{Mg}) را نشان می‌دهد. این مقادیر با تغییرات دما و فشار برای این کانی‌ها در یک نمونه از سنگ‌های دگرگون جندق به نمایش در آمده‌اند. ستاره‌ی نشان داده شده روی شکل مقدار آهن در گارنت و مقدار منیزیم در بیوتیت را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر گارنت و بیوتیت با این ترکیب در سنگ با شیمی کل مشخص شده (در بالای شکل به‌صورت مقادیر مولی عناصر) در فشار ۵ کیلوبار و دمای حدود ۵۳۰°C به تعادل می‌رسد. نتیجه‌ی این محاسبات دما و فشار را به‌طور مشخص ارائه می‌دهند. فشار و دمای محاسبه شده توسط [۱۶] به ترتیب ۲ تا ۶٫۴ کیلوبار و ۴۰۰ تا ۶۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. نتایج حاصل از محاسبه دما و فشار با استفاده از روش شبه‌مقاطع در این مقاله ضمن تایید نتایج حاصل از بررسی‌های طباطبائی منش و شریفی [۱۶] دما و فشار را برای نمونه‌ی مورد بررسی مشخص‌تر به دست می‌دهد.

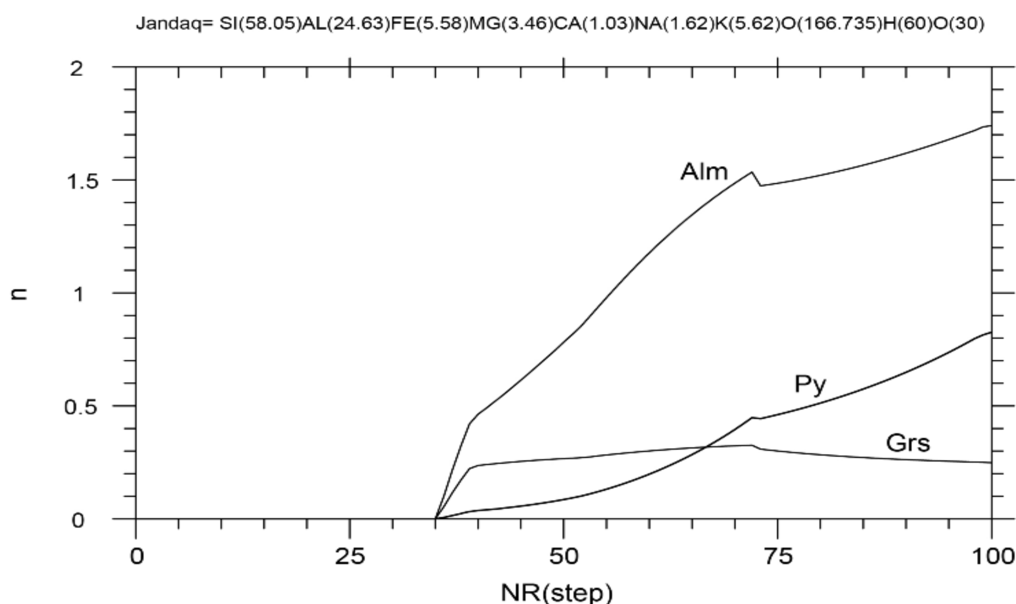
شکل ۶ نشان می‌دهد که با شکست کلریت و تشکیل گارنت، این کانی دارای منطقه‌بندی شیمیایی شده است. در دمای پایین قسمتی از کلریت که آهن بیشتری دارد (به‌صورت محلول جامد) وارد واکنش شده و تشکیل گارنت را می‌دهد. با افزایش دما قسمت غنی از منیزیم کلریت نیز واکنش داده و به گارنت تبدیل می‌شود. چنانکه از شکل ۶ پیداست، منطقه بندی گارنت در گارنت‌های منطقه‌ی گارنت شدیدتر از منطقه‌بندی گارنت‌ها در منطقه‌ی استارولیت و سیلیمانیت (با این توضیح که در سنگ‌های منطقه‌ی جندق سیلیمانیت تشکیل نشده است) است.

بررسی منطقه‌بندی گارنت در شیست‌های رسی جندق با استفاده از مدل‌سازی ترمودینامیکی با برنامه THERIAK-DOMINO نشان می‌دهد که مقدار اعضای نهایی پیروپ و آلماندن طی دگرگونی پیش، رونده افزایش یافته و مقدار عضو نهایی گروسولار کاهش می‌یابد (شکل ۷). در منحنی شکست مشخصی دیده می‌شود که می‌توان آن را به واکنش خروج کلریت از سنگ‌ها وابسته دانست.

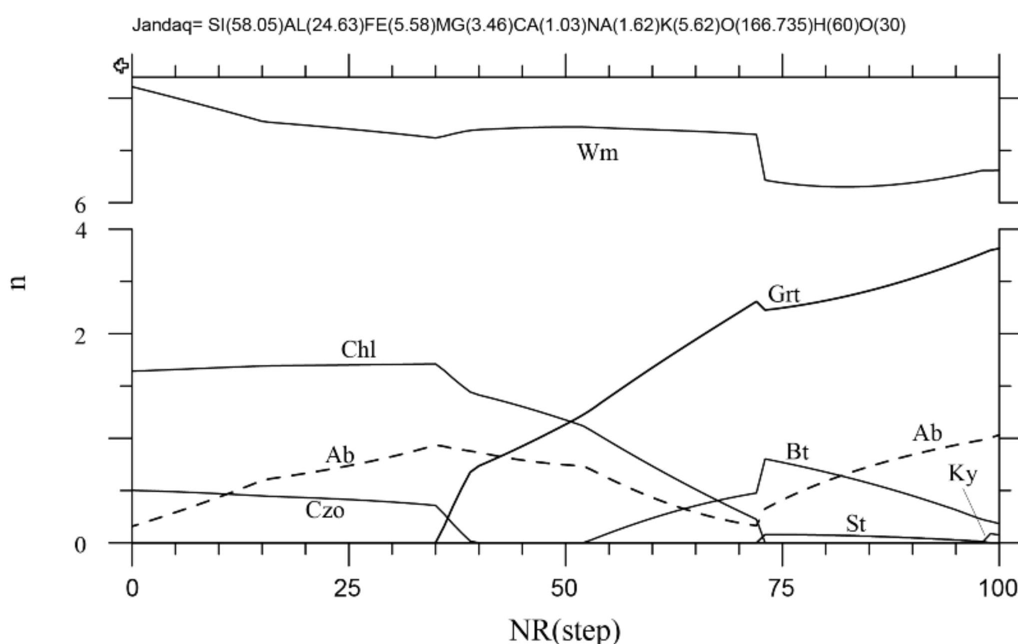
یکی از کاربردهای مهم محاسبات ترمودینامیکی، امکان مدل‌سازی تشکیل و ناپدید شدن فازهای مختلف کانی‌شناسی حین دگرگونی پیش رونده (و یا پس رونده) است. با توجه به کانی‌های موجود در سنگ‌های رسی دگرگون منطقه‌ی جندق و شیمی سنگ کل، اقدام به مدل سازی تغییرات فازی شده است (شکل ۸).



شکل۶ منطقه‌بندی در گارنت (با در نظر گرفتن کسر مولی آهن) در منطقه‌های گارنت و استارولیت (و زون سیلیمانیت) در سنگ‌های دگرگون منطقه‌ی جندق.



شکل ۷ افزایش مقدار آلماندن و پیروپ و کاهش مقدار گروسولار در گارنت با افزایش درجه‌ی دگرگونی (دگرگونی پیش رونده). کاهش ناگهانی در مقدار آلماندن و پیروپ را که با شکست در منحنی مشخص شده است، می‌توان به شکست کانی کلریت وابسته دانست.



شکل ۸ بررسی چگونگی پیدایش و ناپدید شدن فازهای مختلف کانیایی حین دگرگونی پیش رونده‌ی سنگ‌های رسی منطقه‌ی جندق. محور عمودی فراوانی نسبی کانی‌ها و محور افقی مراحل مختلف دگرگونی پیش رونده است.

تغییرات کانی‌شناسی برای کانی‌های میکای سفید (Wm)، گارنت (Grt)، کلریت (Chl)، آلبیت (Ab)، بیوتیت (Bt)، کیانیت (Bt)، استارولیت (St)، و کلینوزوئیسیت (Czo) بررسی شده‌اند (شکل ۸). لازم به یادآوری است که کلینوزوئیسیت و کیانیت در سنگ‌های مورد بررسی شکل نگرفته‌اند. چنانکه از مدل‌سازی ترمودینامیکی پیداست، میکای سفید در طول دگرگونی پایدار است هر چند مقدار آن با رشد فزاینده بیوتیت در درجات بالای دگرگونی کاهش می‌یابد. همچنین میکای سفید فراوان‌ترین کانی در سنگ‌هاست. این برداشت با مدل سازی بر مشاهدات سنگ‌نگاری طباطبائی منش و شریفی [۱۶] همخوانی دارد. کلریت تا مرحله پیدایش بیوتیت، گارنت و استارولیت در سنگ‌ها پایدار است و با تشکیل این کانی‌ها

ناپدید می‌شود. بیوتیت رشد فزاینده‌ای نشان می‌دهد هر چند که یک افزایش محسوس در مرحله‌ی کاهش میکای سفید مشخص است. پیدایش استارولیت در مراحل بالای دگرگونی و هنگام مصرف شدن کلریت است و همخوانی بسیار کوچکی بین پایداری کلریت و استارولیت دیده می‌شود. این امر حاکی از آن است که در گستره‌ی دمایی و فشاری بسیار کوچک، کلریت و استارولیت می‌توانند در این شیمی سنگ کل خاص با هم در حال تعادل باشند. کانی‌های آلبیت و کلینوزوئیسیت جزو کانی-های سیستم KFMASH نیستند و نمی‌توان پیدایش و ناپدید شدن آن‌ها را در ارتباط با کانی‌های سیستم KFMASH بررسی کرد هرچند مدل‌سازی ترمودینامیکی انجام شده روند تغییرات این دو کانی را در ارتباط با شیمی سنگ‌کل نشان می-دهد.

برداشت

مدل سازی‌های ترمودینامیکی و دما- فشارسنجی زمین‌شناسی برای سنگ‌های دگرگون را می‌توان با استفاده از مجموعه کانی-شناسی موجود در سنگ و شیمی کل سنگ و با بهره گیری از برنامه‌های کامپیوتری مناسب و بانک اطلاعات ترمودینامیکی اعضای نهایی کانی‌ها انجام داد. این نوع مطالعات اطلاعات با ارزشی از شرایط تشکیل سنگ‌ها در اختیار ما قرار می‌دهند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های منتشر شده برای سنگ‌های رسی دگرگون منطقه جندق مدل‌سازی ترمودینامیکی ظهور و ناپدید شدن کانی‌ها با افزایش درجه دگرگونی و محاسبه شرایط دمایی و فشاری تشکیل سنگ‌ها انجام پذیرفته است. همچنین چگونگی منطقه‌بندی شیمیایی گارنت و بیوتیت بررسی شده است. این نتایج، ضمن تائید بررسی قبلی، دما و فشار را دقیق‌تر مشخص کرده و چگونگی منطقه‌بندی شیمیایی در کانی‌ها را به روشنی نشان می‌دهد. هدف اصلی از این مقاله معرفی قابلیت‌های استفاده از مدل‌سازی‌ها و محاسبات ترمودینامیکی با روش شبه‌مقاطع است.

قدردانی

از آقای دکتر سید مسعود همام برای مطالعه دقیق این مقاله و ارائه نقطه نظرهای سازنده که موجب بهتر شدن کیفیت آن شده است بسیار سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Spear F.S., *"Metamorphic phase equilibra and pressure-temperature-time paths",* vol. 824, Monograph. Mineralogical Society of America, Washington, (1993) DC, 824 pp

[2] Essene E.J., "*Geologic thermometry and barometry*", In: Ferry JM (ed) Characterization of metamorphism through mineral equilibria, reviews in mineralogy, vol. 10, Mineralogical Society of America, Washington, DC, (1982) pp 153–205.

[3] Powell R., Holland T.J.B., "*Optimal geothermometry and geobarometry"*, American Mineralogist, 79 (1994) 120-33.

[4] Holdaway M.J., *"Optimization of some key geothermobarometers for pelitic metamorphic rocks"*, Mineralogical Magazine 68 (2004) 1–14.

[5] Worley B., Powell R., "*High-precision relative thermobarometry; theory and a worked example"*, Journal of Metamorphic Geology 18 (2000) 91–101.

[6] Essene E.J., *"The current status of thermobarometry in metamorphic rocks"*, In: Daly JS, Cliff RA, Yardley BWD (eds) Evolution of metamorphic belts. Geological Society Special Publication, Blackwell, Oxford, (1989) pp 1–44.

[7] Hensen B.J., *"Theoretical phase relations involving cordierite and garnet in the system MgO-FeO- Al_2O_3-SiO_2",* Contributions to Mineralogy and Petrology 33(1971) 191-214.

[8] Hoschek G., *Comparison of calculated P-T pseudosections for a kyanite eclogite from the Tauern Window, Eastern Alps, Austria*. European Journal of Mineralogy 16(2004):59–72.

[9] Konrad-Schmolke M., Handy M. R., Babist J., O'Brien P. J., *Thermodynamic modeling of diffusion-controlled garnet growth*. Contributions to Mineralogy and Petrology (2005) 16: 181–195.

[10] Omrani H., Moazzen M., Oberhänsli R., Tsujimori T., Bousquet R., Moayyed M., *"Metamorphic history of glaucophane-paragonite-zoisite eclogites from the Shanderman area, northern Iran",* Journal of metamorphic Geology, 31 (2013) 791–812.

[11] Powell R., Holland T. J. B., *"An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations. III. Application methods, worked examples and a computer program"*, Journal of Metamorphic Geology, 6 (1988) 173-204.

[12] Connolly J.A.D., Kerrick D.M., *"An algorithm and computer program for calculating computer phase diagrams"*, CALPHAD, 11 (1987) 1-55.

[13] Connolly J.A.D., *"Calculation of multivariable phase diagrams: an algorithm based on generalized thermodynamics",* American Journal of Science, 290 (1990) 666-718.

[14] de Capitani C., Petrakakis K., "*The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software",* The American Mineralogist, 95(7)(2010) 1006–1016.

[15] Berman R.G., *"Internally consistent thermodynamic data for minerals in the system* Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2", Journal of Petrology, 29(1988) 445-552.

[۱۶] طباطبایی منش م.، شریفی م.، *"ارزیابی شرایط ترمودینامیکی (P-T) تشکیل شیست های متاپلیتی جندق (شمال شرق استان اصفهان)"*. پترولوژی، سال دوم، شماره پنجم، بهار ۱۳۹۰. صفحه ۸۱-۹۲.

[۱۷] نبوی م .ح.، *"دیباچ های بر زمین شناسی ایران"*، سازمان زمین شناسی کشور.

[18] Romanko E., Kokorin Y. U., Krivyakin B., Susov M., Morozov L., Sharkovski M.*, "Outline of metallogeny of Anarak area (Central Iran)",* Ministry of Mines and Metals, Geological Survey of Iran, V/O Technoexport (1984).

[۱۹] باباخانی ع. ر.، *"نقشه زمین شناسی جندق، ۱:۲۵۰۰۰۰"*، سازمان زمین شناسی کشور ۱۳۶۶.